第47卷　第1期
2024年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 1
Jan. 2024

# 黄河流域城市生态韧性时空分异及收敛研究
## ——基于七大城市群61个城市的实证分析

王松茂，　宁文萍，　牛金兰，　安　康

（山东农业大学经管学院，山东 泰安　271018）

**摘　要：** 科学测度黄河流域城市群城市生态韧性的发展现状及收敛趋势，对于黄河流域城市生态保护及高质量发展具有重要意义。选取2011—2020年黄河流域七大城市群61个地级市面板数据，以演化韧性为研究视角，从“抵抗-响应-创新”等维度，构建城市生态韧性评价指标体系，利用核密度估计和自然断裂法考察城市生态韧性的空间分异，借助不同类型收敛模型解析城市生态韧性的收敛趋势。研究表明：(1) 黄河流域城市生态韧性总体均值为0.093，且呈缓慢发展趋势。(2) 城市生态韧性表现为“下游城市群强、上中游城市群弱”的空间格局，城市群内部形成了“核心及省会城市—外围及边缘城市”递减的空间分布。(3) 黄河流域和各城市群内部均存在绝对$\beta$收敛，其中晋中城市群收敛最快。加入控制变量后，黄河流域和各城市群内部呈现显著条件$\beta$收敛趋势，且收敛速度均有提升。此外，经济发展水平、人口密度等变量对城市生态韧性收敛的影响具有显著异质性。

**关 键 词：** 黄河流域；城市群；城市生态韧性；时空分异；空间收敛

**文章编号：** 1000－6060(2024)01－0093－11(0093～0103)

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》提出建设“韧性城市”(http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm)。党的二十大报告明确提出“打造宜居、韧性、智慧城市”(https://lsrm.hinews.cn/xinwen/show-17027.html)。城市生态韧性作为城市韧性重要维度，已成为城市生态风险防控和韧性城市发展的重要任务。黄河流域是典型的生态脆弱区，集聚着山东半岛、关中平原、中原城市群3个区域级城市群和晋中、兰西、宁夏沿黄及呼包鄂榆城市群4个地方性城市群。城市群是黄河流域发展的重要载体，实现黄河流域城市生态韧性发展的重点在于城市群城市生态韧性的有效提升。然而，受到区位禀赋、经济发展等的影响，沿黄各城市群在生态本底及其保护、建设与治理等方面存在诸多差异。那么，黄河流域七大城市群城市生态韧性呈现怎样的时空规律？各城市群城市生态韧性的收敛趋势又是如何？以上问题的探究，对于深刻认识黄河流域城市群城市生态韧性发展现状，全面推动黄河流域生态保护协调发展和“韧性城市”建设具有重要意义。

城市生态韧性是当前及未来城市发展与规划的重要方向。目前，有关城市生态韧性的研究内容主要包括3个方面：(1) 概念与内涵：韧性内涵经历了由“工程韧性”推演到“生态韧性”，继而发展到“演化韧性”的2次重要嬗变。“工程韧性”和“生态韧性”均属于均衡论视角[1]。均衡视角下，国外学者认为生态韧性是城市生态系统对风险干扰的预防、响应及恢复能力[2]。基于演化论视角，Hosseini认为韧性是系统固有属性，不再强调城市生态系统恢复到干扰前状态的能力，更强调系统通过调整结构、改变路径实现转型发展的能力[3]。国内学者则主要基

**收稿日期：** 2023-06-30；　**修订日期：** 2023-08-21

**基金项目：** 国家社科基金项目(23FJYB037)；山东省自然科学基金面上项目(ZR2023MD077)；山东省重点研发计划(软科学项目)(2022RKY06011)资助

**作者简介：** 王松茂(1980-)，男，教授，主要从事旅游经济、旅游绿色发展研究. E-mail: wsm0316@sdau.edu.cn

**通讯作者：** 安康(1979-)，男，副教授，主要从事农村经济、乡村旅游研究. E-mail: ankang666@126.com

于城市生态治理与风险防控两视角进行定义。沈洁等[4]认为城市生态韧性是城市生态系统对扰动来临前防御、干扰发生时及时响应、灾难消退后进行优化的动态能力。周成等[5]则强调生态系统吸收干扰、系统重组及持续性发展的能力。(2) 评价与测度:由于目前学界对城市生态韧性的概念莫衷一是,其在指标体系构建方面也各有不同。国外研究多从生态系统可持续发展与服务[6-7]、城市社会生态等视角进行分析[8],而国内研究大多通过构建多维指标体系对城市生态韧性进行量化分析,包括基于景观生态格局的规模-密度-形态体系[9]和依托驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)和压力-状态-响应(PSR)方法的抵抗-适应-恢复模型[10]。(3) 影响因素:国内外研究关注自然及人类活动等多种原因的影响。自然因素的研究聚焦生态系统本身,例如,气候、水文、植被和地形等[11];人类活动主要包括城市化、人口集聚、科技创新等[9-10]。部分学者指出基于自然与人类活动,明确城市生态韧性的制约因素,有利于解释区域城市生态韧性差异的内在原因[10]。

近年来,黄河流域生态方面的研究趋于丰富,相关成果主要可归纳为:(1) 研究主题:包括基于门槛效应的生态效率研究[12]、关注空间分析的生态脆弱性研究[13]以及聚焦于影响因素的生态安全[14]等。(2) 研究内容:一是以水平测度和时空演化为主的演变规律[12-14];二是聚焦于不同因素驱动作用的机制分析[15-16];三是围绕城镇化等高质量发展内容,展开的与生态环境协调发展的研究,具体体现为脱钩关系[16]、互动响应[17]及耦合协调[18]等。(3) 研究方法:主要借助空间统计分析[12]、分位数回归[14]、耦合协调度模型[18]等。既有研究初步较为完整地勾勒出黄河流域生态环境的认知理论体系,但从韧性视角下探究城市生态系统的理论和实证研究则相对薄弱,仅有少数学者对黄河流域城市生态韧性展开研究,如周成和郭海红等考察了生态效率、城镇化与城市生态韧性的耦合协调关系[5,19],郭力等量化了数字经济对城市生态韧性的影响效应[20]。由上可知,当前针对黄河流域城市群城市生态韧性收敛性的研究还存在着"空白"。而由于黄河流域各城市群的资源禀赋、发展路径各不相同,近年来城市生态韧性发展各有不同。因此,深入解析黄河流域城市群城市生态韧性的时空分异和收敛性,对缩小流域内城市生态韧性差距,助力黄河流域生态保护协调发展意义重大。

鉴于此,本文可能的边际贡献为:(1) 研究内容上,既有研究多关注城市生态韧性水平测度分析,而本文深入探索了黄河流域城市生态韧性的收敛性,一定程度上是对现有研究的有益补充;(2) 研究视角上,演化韧性实现了韧性研究从稳定均衡到动态发展的跨越,本文基于演化韧性视角,综合评估城市生态系统的本质内涵和创新能力;(3) 研究方法上,"空间"因素在区域生态环境研究中日益受到关注,而纳入"空间"因素研究生态环境收敛趋势的文献仍显不足,本文在计量模型中纳入"空间"因素,探析了黄河流域城市群城市生态韧性的收敛趋势。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

黄河流域生态本底脆弱,且沿线省区产业倚能倚重,城市群污染排放占比超过70%[21],面临着生态保护和高质量发展双重难题。黄河流域集聚了4个地区性城市群(兰西、晋中、呼包鄂榆和宁夏沿黄城市群)和3个区域级城市群(山东半岛、中原和关中平原城市群)。本文参照《黄河流域生态保护与高质量发展规划纲要》,选取黄河流域七大城市群的61个地级及以上城市为研究对象(图1)。

### 1.2 数据来源

本文数据主要收集自《中国城市统计年鉴(2012—2021年)》、黄河流域各省份及地级市统计年鉴、统计公报。所用处理数据(人均水资源量等)通过指标间梳理运算的乘除合成计算得出;归一化植被指数(NDVI)为30 m分辨率NDVI数据,收集自中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)。期间个别缺失值利用年平均增长量进行线性插值法补充。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 熵权-TOPSIS** 本文采用熵权-TOPSIS[22]法对城市生态韧性作出评价。步骤如下:

(1) 熵权法确定标准化指标权重,计算公式为:

$$e_j = -k\sum_{i=1}^{m}\left[\left(y_{ij}\Big/\sum_{i=1}^{m}y_{ij}\right)\times\ln\left(y_{ij}\Big/\sum_{i=1}^{m}y_{ij}\right)\right] \tag{1}$$

$$w_j = \left(1-e_j\right)\Big/\sum_{j=1}^{12}\left(1-e_j\right) \tag{2}$$

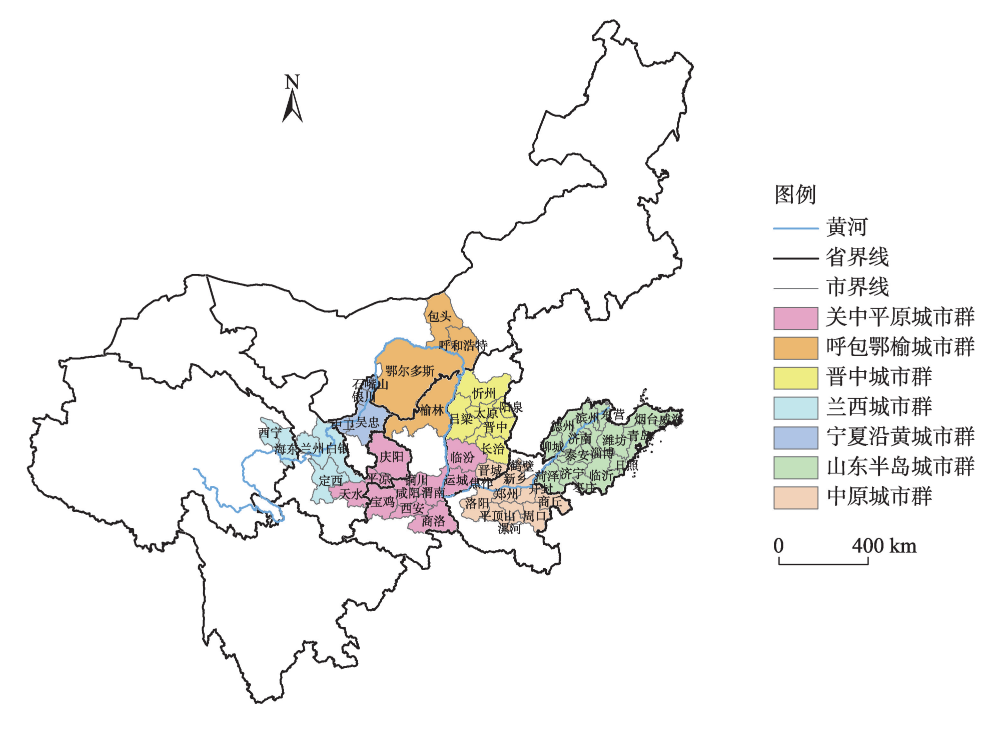



图1　研究示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

式中：$e_j$ 为第 $j$ 项指标的信息熵；$w_j$ 为第 $j$ 项指标的权重；$m$ 为评价年数；$y_{ij}$ 为第 $i$ 年第 $j$ 项指标的原始数值；$k$ 为波尔茨曼常量。

（2）确定正理想解与负理想解，计算欧式距离：

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(f_{ij}-f_j^+\right)^2}\ (i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m) \quad (3)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(f_{ij}-f_j^-\right)^2}\ (i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m) \quad (4)$$

式中：$S_i^+$ 和 $S_i^-$ 分别为第 $i$ 个评价目标到最优解和最劣解的距离；$f_j^+$ 与 $f_j^-$ 分别为第 $j$ 个目标到最优目标及最劣目标的距离；$f_{ij}$ 为第 $i$ 个目标第 $j$ 个评价指标的权重规格化值；$n$ 为样本观测值的个数。

（3）计算各指标与理想解的贴近程度（$C_j$），计算公式为：

$$C_j = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}\ (i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m) \quad (5)$$

式中：$C_j$ 为第 $j$ 个研究对象的贴近度，取值范围为[0, 1]，其值越大，则研究对象越优。

**1.3.2　城市生态韧性的指标构建**　演化论视角下，城市生态韧性是城市生态系统的一种固有性质，独立于外界干扰，伴随着时间变化不断进行非确定性的动态演变，更强调系统的学习力和创新性[3]。在系统发展变化日益复杂的形势下，“演化韧性”更加适合当前城市生态韧性的研究，这有助于韧性研究实现从稳定均衡到动态发展的跨越[23]。参考王松茂等[24]研究，本文从“抵抗-响应-创新”3个能力维度构建城市生态韧性指标体系，抵抗能力指依托自然禀赋，系统承受干扰、控制功能和结构不变的能力；响应能力表示系统遭受干扰时，多样化应对冲击的能力；创新能力为系统在应对干扰的基础上，通过学习、创新实现全新发展的能力（表1）。

**1.3.3　核密度估计**　核密度估计从数据本身的特点进行函数拟合分布，避免了人为设定函数形式可能造成的误差[25]。其表达形式为：

$$f(x) = \frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n} k\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \quad (6)$$

式中：$X_i$ 为第 $i$ 个独立同分布的观测值；$x$ 为观测值的平均值；$k\left(\frac{X_i - x}{h}\right)$ 为高斯核函数；$n$ 为样本观测值的个数；$h$ 为带宽。

**1.3.4　收敛模型**　收敛机制可揭示研究对象属性值是否随着时间推移，在空间上的差距缩小。$\beta$收敛指随时间推移，城市生态韧性（UER）较低的城市群因具有更高增幅而逐步赶上城市生态韧性较高的城市群。绝对$\beta$收敛指的是在不考虑宏观异质性影

表1 城市生态韧性评价指标体系

Tab. 1 Urban ecological resilience evaluation index system

| 目标层 | 一级指标 | 代码 | 二级指标 | 属性 | 权重/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 城市生态韧性 | 抵抗维度 | RS1 | 人均水资源量/$m^3$·人$^{-1}$ | + | 8.98 |
| | | RS2 | 人均绿地面积/$m^2$ | + | 5.81 |
| | | RS3 | 归一化植被指数/% | + | 1.73 |
| | | RS4 | 空气优良天数/d | + | 1.43 |
| | 响应维度 | RS5 | 建成区绿化覆盖率/% | + | 0.35 |
| | | RP6 | 一般工业固体废弃物综合利用率/% | + | 1.44 |
| | | RP7 | 污水处理厂集中处理率/% | + | 1.07 |
| | | RP8 | 生活垃圾无害化处理率/% | + | 0.53 |
| | | RP9 | 环保占财政支出的比重/% | + | 21.40 |
| | 创新维度 | IN10 | R&D经费投入占GDP的比重/% | + | 26.03 |
| | | IN11 | 专利授权数量/个 | + | 16.67 |
| | | IN12 | 每万人在校大学生数/人 | + | 14.57 |

注:+表示正向指标。

响因素情况下,随时间推移,各地区城市生态韧性产生趋同的趋势,而条件$\beta$收敛纳入了宏观异质性影响因素[26],绝对$\beta$收敛的模型为:

$$\ln\left(\frac{UER_{i,t+1}}{UER_{i,t}}\right)=\alpha+\beta\ln UER_{i,t}+\mu_i+\eta_i+\varepsilon_{it} \quad (7)$$

式中:$i$为地区;$t$为年份;$UER_{i,t}$为$i$地区在$t$时期的城市生态韧性;$UER_{i,t+1}$为$i$地区在$t+1$时期的城市生态韧性;$\ln\left(\frac{UER_{i,t+1}}{UER_{i,t}}\right)$为$i$地区在$t$至$t$+1时期跨度内城市生态韧性的年度增长率的对数;$\ln UER_{i,t}$为$i$地区在$t$时期的城市生态韧性的对数;$\alpha$为常数项;$\mu_i$和$\eta_i$分别为$i$城市的地区与时间效应;$\varepsilon_{it}$为$i$地区在$t$时期的随机干扰项;$\beta$为收敛参数,若$\beta$<0则城市生态韧性存在$\beta$收敛,反之则为发散。

考虑到宏观影响要素存在跨区域流动,各区域之间通常存在程度不一的空间依赖性,故本研究检验考虑了空间因素[27]。采用空间杜宾模型(SDM)变换的绝对$\beta$收敛模型:

$$\ln\left(\frac{UER_{i,t+1}}{UER_{i,t}}\right)=\alpha+\rho\sum_{j=1}^{n}W_{ij}^{O}\ln\left(\frac{UER_{j,t+1}}{UER_{j,t}}\right)+\beta\ln UER_{i,t}+\theta\sum_{j=1}^{n}W_{ij}^{O}\ln(UER_{j,t})+\mu_i+\eta_i+\varepsilon_{it} \quad (8)$$

式中:$\rho$为城市生态韧性的空间自回归系数,表示受邻近地区城市生态韧性的影响;$\theta$为解释变量空间自回归系数;$W_{ij}^{O}$为$i$与$j$两地区间的空间权重矩阵,本文结合地理和经济权重矩阵,构建综合嵌套矩阵[28],以期刻画出包含距离及经济双重影响的空间关联效应。

空间计量模型选择的程序,首先是构建一般面板模型,采用稳健LM(Robust Lagrange Multiplier)统计量检验空间自相关,其次构建空间面板模型,利用Wald统计量和LR统计量进行检验,若$\theta=0$和$\theta+\rho\beta=0$的2个原假设都被拒绝,选用SDM模型;若$\theta=0$成立且LM检验支持空间滞后模型(SAR),选择SAR模型,见式(9);若$\theta+\rho\beta=0$成立且LM检验支持空间误差模型(SEM),选择SEM模型,见式(10)[29]。

$$\ln\left(\frac{UER_{i,t+1}}{UER_{i,t}}\right)=\alpha+\rho\sum_{j=1}^{n}W_{ij}^{O}\ln\left(\frac{UER_{j,t+1}}{UER_{j,t}}\right)+\beta\ln UER_{i,t}+\mu_i+\eta_i+\varepsilon_{it} \quad (9)$$

$$\ln\left(\frac{UER_{i,t+1}}{UER_{i,t}}\right)=\alpha+\beta\ln UER_{i,t}+\mu_i+\eta_i+\varepsilon_{it}, \quad \varepsilon_{it}=\lambda\sum_{j=1}^{n}W_{ij}^{O}\varepsilon_{it}+\sigma_{it} \quad (10)$$

式中:$\lambda$为误差项的空间自回归系数,显示随机冲击;$\sigma_{it}$为$i$地区在$t$时期的随机扰动项。

采用SDM模型进一步构建条件$\beta$收敛模型为:

$$\ln\left(\frac{UER_{i,t+1}}{UER_{i,t}}\right)=\alpha+\rho\sum_{j=1}^{n}W_{ij}^{O}\ln\left(\frac{UER_{j,t+1}}{UER_{j,t}}\right)+\beta\ln UER_{i,t}+\theta\sum_{j=1}^{n}W_{ij}^{O}\ln(UER_{j,t})+\delta\ln CV_{i,t+1}+\gamma\sum_{j=1}^{n}W_{ij}^{O}\ln CV_{j,t}+\mu_i+\eta_i+\varepsilon_{it} \quad (11)$$

式中：$CV_{i,t+1}$为$i$地区在$t+1$时期控制变量集合；$CV_{j,t}$为$j$地区在$t$时期控制变量集合；$\delta$为控制变量待估参数；$\gamma$为控制变量的空间自回归系数。

本文参考已有研究成果，以经济发展水平（ECO）、人口密度（PDE）、产业结构（IND）、技术进步（TEC）和环境规制（ER）为控制变量。以人均GDP衡量经济发展水平[30]；以年末常住人口与行政区域土地面积的比值体现人口密度[31]；采用第二产业产值占GDP的比重表达产业结构[30]；通过科学支出占公共财政支出比重衡量技术进步[32]；利用工业废水、$SO_2$、烟(粉)尘排放量与第二产业产值进行环境规制强度指数[33]构建，具体公式如下：

$$ER_{i,t}=\frac{1}{\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\frac{Polu_{ij,t}/Polu_{j,t}}{Y_{i,t}/Y_{t}}} \tag{12}$$

式中：$ER_{i,t}$为$t$年$i$市的环境规制强度指数；$Polu_{ij,t}$为$t$年$i$市$j$污染物排放量；$Polu_{j,t}$为$t$年全部样本$j$污染物排放量；$Y_{i,t}$为$t$年$i$市第二产业产值；$Y_t$为$t$年全部样本的第二产业产值。

## 2　结果与分析

### 2.1　黄河流域城市群城市生态韧性时序演进

图2呈现了黄河流域和各城市群城市生态韧性变化趋势，2011—2020年黄河流域均值为0.093，从2011年0.086上升至2020年0.105，年均增长率为2.25%。自十八大生态文明建设提出，黄河流域“以污染换发展”的传统模式有所改善，但转变过程艰难缓慢。城市群层面，山东半岛城市群年均值为0.185，年增幅为5.19%，研究期内始终领先；其次为关中平原城市群，年均值为0.090，中原城市群发展较为落后，年均值仅为0.070，其余各城市群发展差异较小。

为揭示黄河流域及各城市群城市生态韧性差异变化的演变轨迹，对黄河流域及各城市群进行了核密度分析(图3)。

分布位置上，黄河流域核密度曲线呈现整体右移趋势，城市生态韧性水平得到有效提升。就各城市群而言，除宁夏沿黄城市群外，其他均呈现右移趋势，城市生态韧性一定程度上有所提高。这反映出自“十二五”规划纲要强调牢固绿色、低碳发展观以来，黄河流域资源利用方式及环境污染均有所改善。

分布形态上，黄河流域核密度曲线呈主峰不断升高，宽度变化不明显的特征。城市群中，中原和晋中城市群分布主峰高度上升但宽度变小，说明其内部城市生态韧性非均衡性逐渐好转。兰西和宁夏沿黄城市群表现相似，主峰下降，宽度增大，这表明内部绝对差异逐渐增大。

分布延展性上，黄河流域和各城市群分布曲线均存在显著右拖尾，体现出群内存在显著高值城市。城市群层面，中原、晋中、呼包鄂榆城市群具有延展收敛性，群内出现极端值的机率逐渐变小。其余城市群，与之相反。

### 2.2　黄河流域城市群城市生态韧性发展空间分异

利用JENK自然断裂法，得到了2011、2014、2017年和2020年黄河流域城市群城市生态韧性的空间可视化分析结果(图4)。从城市群尺度看，总

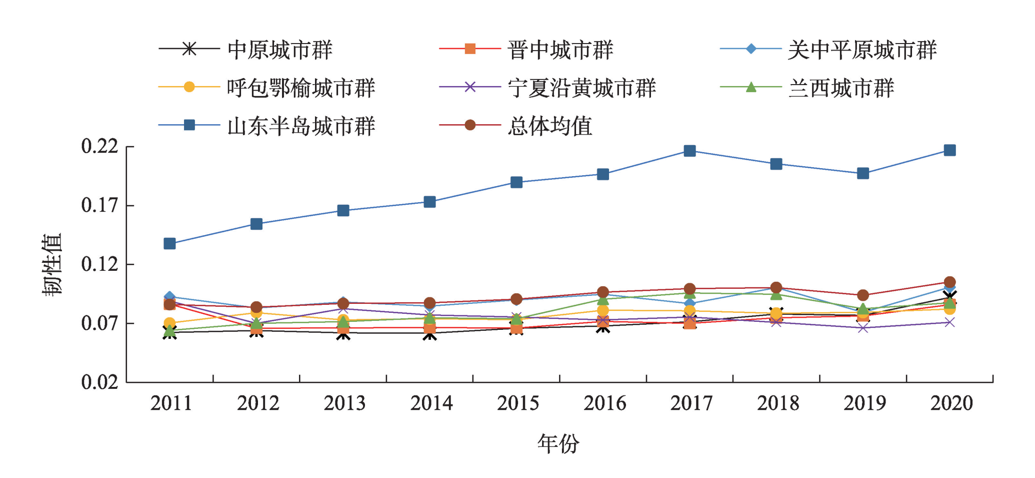



图2　黄河流域城市群城市生态韧性变化趋势

Fig. 2　Evolution of urban ecological resilience of urban agglomeration in the Yellow River Basin

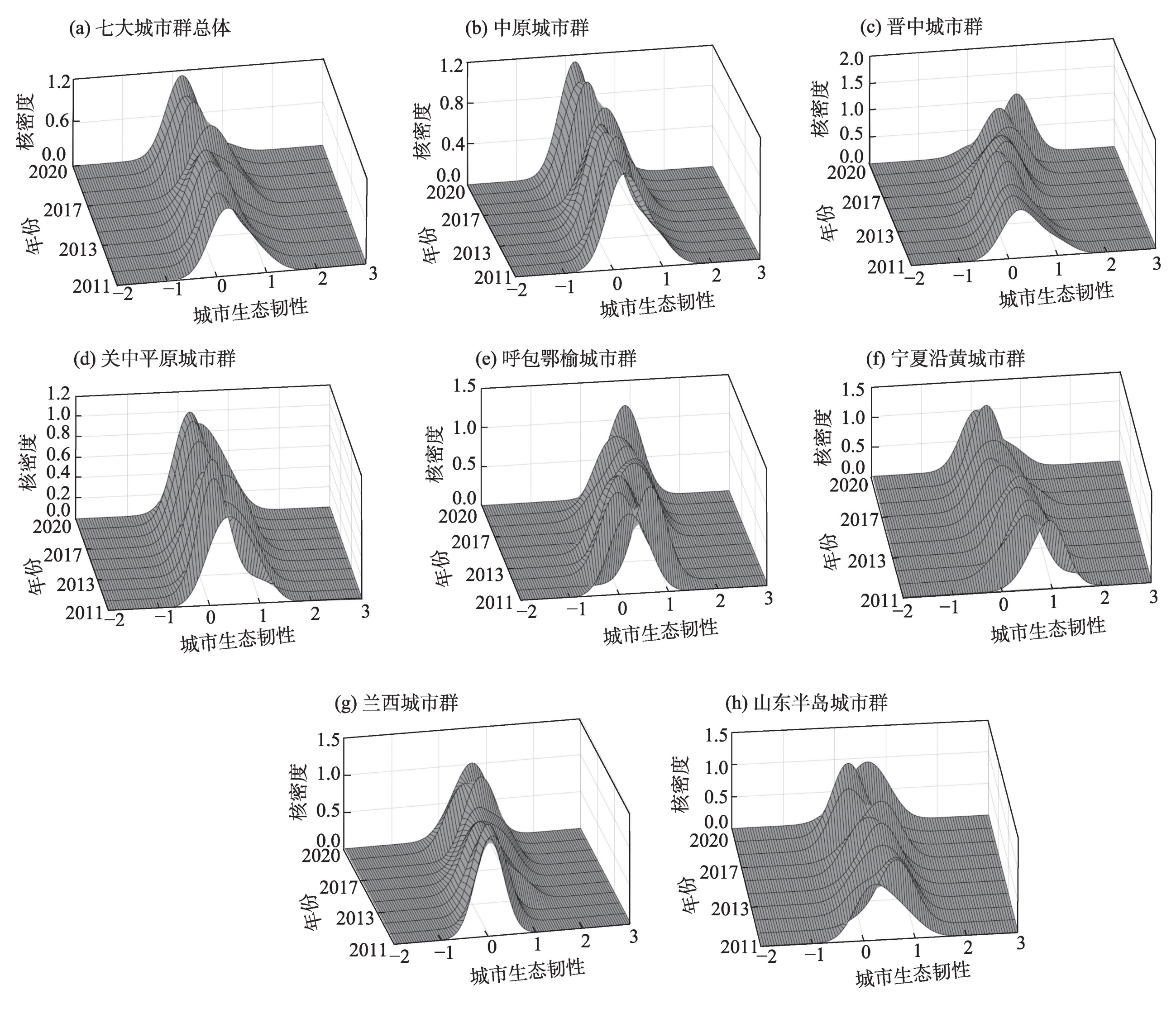



图3 黄河流域城市生态韧性三维核密度

Fig. 3 Three-dimensional kernel density of urban ecological resilience in the Yellow River Basin

体表现为"下游城市群强、上中游城市群弱"的分布格局,山东半岛城市群始终领先。2011年中原城市群较为薄弱,处于末位,为0.063。2014年兰西城市群城市生态韧性提升至0.075;晋中城市群下降趋势明显,由0.086降至0.066。2017年除山东半岛城市群外,自2011年以来,兰西城市群增速最快,增幅为6.95%。2020年中原、晋中城市群呈现显著增长局面,3 a间分别增长了0.021、0.016。

从地(市、州、盟)尺度看,城市群内部呈现出以省会为核心的城市生态韧性"高地"、以城市群边界为代表的城市生态韧性"洼地"。具体地,以兰州(0.118)、郑州(0.182)、西安(0.193)为代表的省会城市的城市生态韧性均值显著高于黄河流域(0.093),形成了"核心及省会城市—外围及边缘城市"递减的空间分布。其中,郑州变化最为显著,10 a间增幅为208.5%。山东半岛城市群形成了济南和青岛"双核引领"格局,其均值分别为0.374和0.375。

## 2.3 黄河流域城市群城市生态韧性收敛分析

(1) 绝对$\beta$收敛

表2显示黄河流域及各城市群的城市生态韧性绝对$\beta$收敛分析结果。LM统计量确定了黄河流域城市生态韧性具有空间自相关,故需利用Wald统计量和LR统计量对空间计量模型进行判断。结果显示,支持应用SDM模型,且被解释变量空间滞后项系数在10%水平下显著为正,这昭示着黄河流域相邻城市群之间城市生态韧性的提升存在空间正向关联,周边城市群城市生态韧性的提升对目标城市群具有带动效应,且黄河流域城市生态韧性的收敛

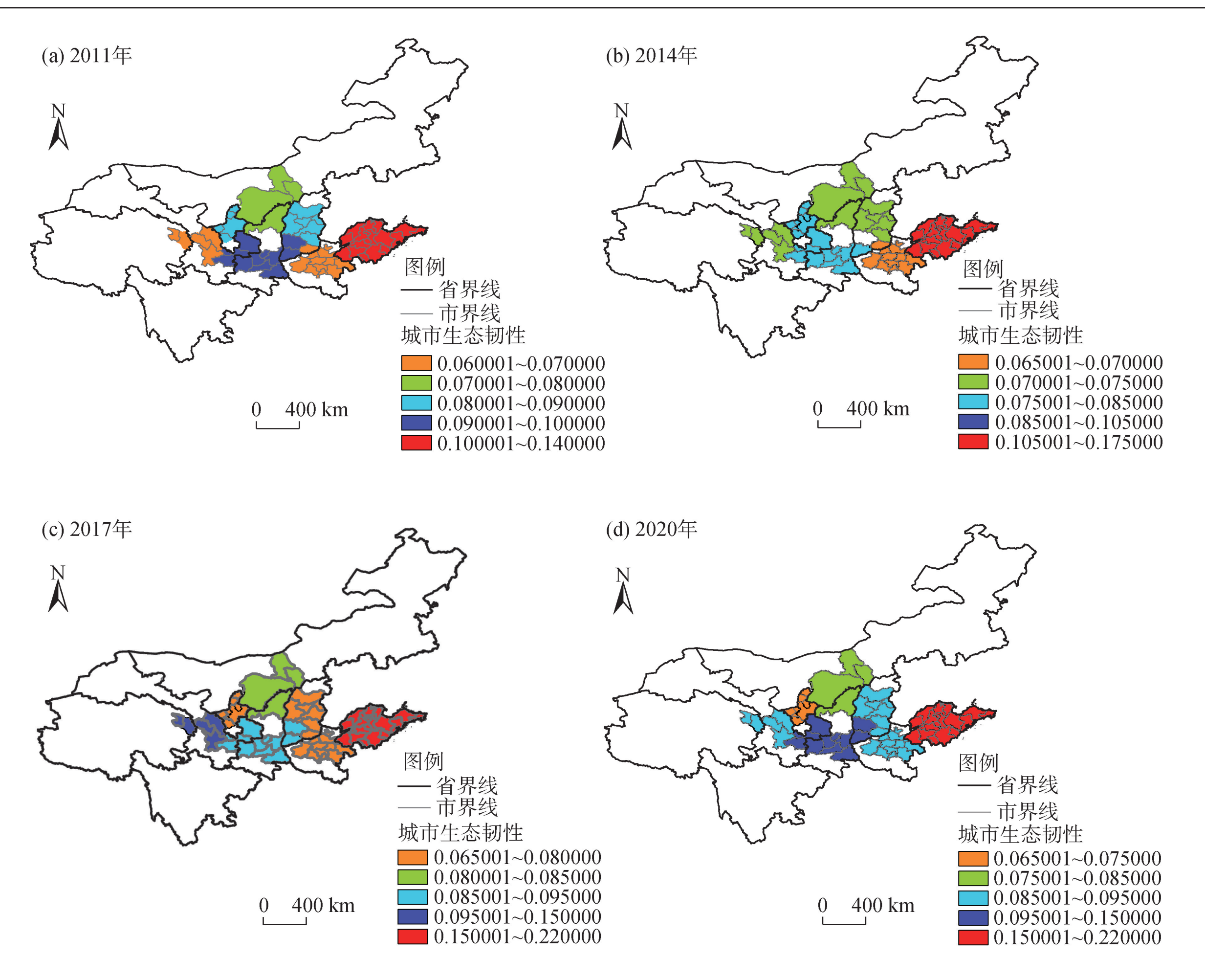



图4　黄河流域城市群城市生态韧性空间分异

Fig. 4　Spatial differentiation of urban ecological resilience of urban agglomeration in the Yellow River Basin

**表2　黄河流域城市群城市生态韧性绝对$\beta$收敛**

**Tab. 2　Absolute $\beta$ convergence of urban ecological resilience of urban agglomeration in the Yellow River Basin**

| 区域 | 总体 | 中原 | 晋中 | 关中平原 | 呼包鄂榆 | 宁夏沿黄 | 兰西 | 山东半岛 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 模型类型 | 双固定<br>SDM模型 | 空间固定<br>OLS模型 | 空间固定<br>OLS模型 | 双固定<br>SAR模型 | 时间固定<br>OLS模型 | 双固定<br>SEM模型 | 空间固定<br>OLS模型 | 时间固定<br>SEM模型 |
| $\beta$ | −0.233*<br>(−1.756) | −0.125***<br>(−3.652) | −0.235***<br>(−4.078) | −0.187**<br>(−1.997) | −0.129***<br>(−4.028) | −0.217**<br>(−2.187) | −0.233***<br>(−3.905) | −0.206***<br>(−4.452) |
| $\theta$ | 0.4107***<br>(4.572) | – | – | – | – | – | – | – |
| $\rho$或$\lambda$ | 0.237**<br>(2.153) | – | – | 0.109<br>(1.427) | – | 0.272*<br>(1.658) | – | 0.232**<br>(1.983) |
| $R^2$ | 0.307 | 0.292 | 0.371 | 0.196 | 0.235 | 0.271 | 0.302 | 0.335 |
| Log-Likelihood | 357.238 | 236.579 | 311.206 | 289.067 | 177.535 | 198.282 | 206.567 | 463.720 |
| 空间固定效应 | 238.563*** | 68.230*** | 35.679*** | 22.681*** | 29.053 | 18.539*** | 61.815*** | 34.625 |
| 时间固定效应 | 147.758*** | 54.276 | 41.508 | 18.837 | 16.972*** | 25.636*** | 50.571 | 29.876*** |
| Hausman检验 | 202.575*** | 38.631*** | 27.818*** | 31.580*** | 17.932*** | 52.077*** | 18.528*** | 30.252*** |
| R-LM(SAR模型) | 26.307*** | 7.602 | 4.375 | 10.528*** | 3.061 | 0.538 | 4.724 | 11.536 |
| R-LM(SEM模型) | 18.236** | 5.931 | 6.963 | 13.642 | 7.371 | 1.573*** | 8.906 | 15.637*** |

注：括号中的数值为标准差；*、**、***分别表示在10%、5%、1%的水平下显著；SEM为空间误差模型；SAR为空间滞后模型；SDM为空间杜宾模型；OLS为普通最小二乘法模型；$\beta$为城市生态韧性收敛系数；$\theta$为解释变量的空间溢出系数；$\rho$或$\lambda$为空间滞后项系数；$R^2$为决定系数；Log-Likelihood为对数似然值；Hausman检验为豪斯曼检验结果；R-LM为拉格朗日乘子的稳定性检验。下同。

系数$\beta$显著为负，说明黄河流域城市生态韧性存在绝对$\beta$收敛。城市群层面，首先城市群中仅关中平原、宁夏沿黄和山东半岛城市群通过稳健LM检验，其他城市群则不适用于空间面板模型。具体而言，LM检验结果支持关中平原城市群采用SAR模型，支持宁夏沿黄和山东半岛城市群采用SEM模型，宁夏沿黄和山东半岛城市群，其各自模型的空间滞后项系数分别在5%和1%的水平下显著为正，而关中平原城市群被解释变量的空间滞后项系数并不显著，这表明着关中平原城市群城市生态韧性$\beta$收敛的原因不包括空间相关性。其次，所有城市群城市生态韧性收敛系数$\beta$均显著为负，均具有绝对$\beta$收敛趋势，表明各城市群城市生态韧性水平会向各自稳态水平收敛，即城市群内城市生态韧性相对落后的城市比相对领先的城市具有更快的增长率，最终以相同的增长率发展，其中晋中城市群收敛最快。

（2）条件$\beta$收敛

表3给出了黄河流域城市群城市生态韧性的条件$\beta$收敛分析结果。本部分空间计量模型选取与绝对$\beta$收敛过程一致。结果显示，第一，黄河流域和各城市群均存在条件$\beta$收敛，其收敛系数均显著为负，意味着在考虑经济发展等经济社会异质性因素后，黄河流域和各城市群城市生态韧性收敛于自身稳态水平的趋势仍存在。第二，各城市群条件$\beta$收敛速度均有一定加快。呼包鄂榆城市群变化明显，为0.075，这显示了所选控制变量的科学合理性。第三，黄河流域和各城市群呈现不同空间效应。与绝对$\beta$收敛中的空间效应不同，呼包鄂榆出现空间误差效应，宁夏沿黄城市群与其相反。而黄河流域、关中平原和山东半岛城市群的空间效应类型未产生变化，其空间滞后项系数均显著为正，这说明上述主体城市生态韧性均具有正向空间溢出。

从控制变量看，各控制变量对收敛的影响具有显著的异质性。以经济发展水平为例，其对中原、呼包鄂榆和山东半岛城市群城市生态韧性具有显著负向影响，这与黄河流域城市群总体一致；但对晋中和宁夏沿黄城市群城市生态韧性发展具有显著正向影响，这说明经济增长会促进中原、呼包鄂榆和山东半岛城市群城市生态韧性向低值收敛，而晋中和宁夏沿黄城市群与其相反，这可能是因为中

**表3 黄河流域城市群城市生态韧性条件$\beta$收敛**

**Tab. 3 Condition $\beta$ convergence of urban ecological resilience of urban agglomeration in the Yellow River Basin**

| 区域 | 总体 | 中原 | 晋中 | 关中平原 | 呼包鄂榆 | 宁夏沿黄 | 兰西 | 山东半岛 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 模型类型 | 双固定<br>SDM模型 | 双固定<br>OLS模型 | 空间固定<br>OLS模型 | 时间固定<br>SAR模型 | 空间固定<br>SEM模型 | 双固定<br>OLS模型 | 空间固定<br>OLS模型 | 时间固定<br>SEM模型 |
| $\beta$ | −0.308$^{***}$<br>（−4.022） | −0.217$^{***}$<br>（−3.908） | −0.268$^{***}$<br>（−4.340） | −0.196$^{***}$<br>（−4.023） | −0.229$^{***}$<br>（−5.135） | −0.236$^{**}$<br>（−2.072） | −0.267$^{***}$<br>（−3.508） | −0.237$^{***}$<br>（−3.826） |
| ECO | −0.209$^{*}$<br>（−1.693） | −0.231$^{***}$<br>（−1.627） | 0.151$^{**}$<br>（2.078） | 0.217<br>（0.627） | −0.228$^{***}$<br>（−3.701） | 0.211$^{*}$<br>（1.608） | 0.152<br>（0.199） | −0.262$^{***}$<br>（−3.627） |
| PDE | 0.171$^{*}$<br>（1.838） | 0.273$^{*}$<br>（1.762） | 0.151<br>（0.529） | 0.189$^{***}$<br>（3.267） | 0.256$^{**}$<br>（1.937） | 0.166$^{*}$<br>（1.880） | 0.151<br>（0.538） | 0.168<br>（1.260） |
| IND | 0.182<br>（1.307） | 0.177<br>（1.085） | 0.166<br>（0.931） | 0.172<br>（0.833） | 0.116$^{**}$<br>（1.921） | 0.147<br>（1.299） | 0.139<br>（1.377） | 0.170<br>（0.050） |
| TEC | −0.134$^{***}$<br>（−4.801） | 0.168<br>（1.053） | −0.120$^{**}$<br>（−1.923） | 0.129<br>（1.118） | 0.134<br>（0.847） | 0.152<br>（1.053） | −0.147$^{**}$<br>（−1.806） | −0.138$^{***}$<br>（−4.135） |
| ER | −0.196$^{***}$<br>（−4.352） | −0.188$^{**}$<br>（−2.136） | −0.201$^{**}$<br>（−2.369） | 0.209<br>（1.784） | 0.101<br>（0.674） | −0.186$^{**}$<br>（−1.991） | 0.201<br>（0.707） | −0.209$^{*}$<br>（−3.635） |
| $\rho$或$\lambda$ | 0.207$^{***}$<br>（3.095） | – | – | 0.219$^{*}$<br>（1.618） | 0.198$^{**}$<br>（1.996） | – | – | 0.193$^{***}$<br>（2.782） |
| $R^2$ | 0.312 | 0.273 | 0.338 | 0.362 | 0.288 | 0.363 | 0.258 | 0.326 |
| Log-Likelihood | 443.523 | 367.325 | 298.306 | 123.387 | 423.783 | 353.128 | 266.574 | 435.958 |
| 空间固定效应 | 312.026$^{***}$ | 73.873$^{***}$ | 40.515$^{***}$ | 31.509 | 40.636$^{***}$ | 36.744$^{***}$ | 50.871$^{**}$ | 42.865 |
| 时间固定效应 | 186.509$^{***}$ | 66.322$^{***}$ | 37.337 | 25.426$^{***}$ | 52.965 | 40.089$^{***}$ | 73.635 | 37.925$^{***}$ |
| Hausman检验 | 263.176$^{***}$ | 56.227$^{***}$ | 27.818$^{***}$ | 34.077$^{***}$ | 29.506$^{***}$ | 68.361$^{***}$ | 28.305$^{***}$ | 37.519$^{***}$ |
| R-LM（SAR模型） | 35.215$^{***}$ | 10.709 | 8.602 | 21.667$^{***}$ | 9.569 | 3.276 | 7.947 | 13.216 |
| R-LM（SEM模型） | 27.024$^{**}$ | 6.253 | 6.841 | 18.509 | 6.872$^{***}$ | 6.253 | 6.256 | 16.508$^{***}$ |

原、呼包鄂榆和山东半岛城市群发展经济的过程中忽视了生态环境对经济社会可持续发展的重要性，而晋中和宁夏沿黄城市群生态本底相对较弱，城市生态韧性较为落后，较为重视绿色发展，经济增长反而会促使城市生态韧性向高值收敛[30]。

## 3 讨 论

通过构建合理的城市生态韧性评价体系，本研究精准测度黄河流域城市生态韧性及发展趋势。其中，对城市生态韧性的分析与既有研究[5]相一致，各城市群亟需加强群间协同联动效应，将城市群塑造为黄河流域城市生态韧性发展的纽带，同时打造城市群内部城市生态韧性发展互助链，以解决“下游强、上中游弱”和省会城市领先的不均衡不充分的发展难题。本研究主要边际贡献在于深入解析黄河流域城市群城市生态韧性的空间分异及收敛性，一定程度上是对现有城市生态韧性研究的有益补充，对于科学提升黄河流域城市生态韧性、协同黄河流域城市生态韧性空间发展，探索大河流域城市生态保护协调发展新模式具有重要意义。

本文仍存在以下不足：考虑到数据的可获得性，本文以黄河流域地级市为研究案例地，未来可选取更微观的县域案例地，将更准确反映城市生态韧性发展状况；此外，城市生态韧性的发展可能会受到多元层面影响，探究城市生态韧性的驱动机制是今后研究的重要内容。

## 4 结 论

（1）黄河流域城市生态韧性表现为波动且缓慢的增长趋势，流域生态治理与保护压力较大。核密度曲线呈现右移趋势，主峰不断升高，宽度变化不明显的特征，表明城市生态韧性有所提升，总体离散程度呈缩小态势。

（2）城市群层面，城市生态韧性表现为“下游城市群强、上中游城市群弱”的空间格局。省会城市的城市生态韧性均值显著高于黄河流域平均水平，城市群内部形成了“核心及省会城市—外围及边缘城市”递减的空间分布格局。

（3）黄河流域和各城市群内部均存在绝对$\beta$收敛，其中晋中城市群收敛最快。加入控制变量后，黄河流域和各城市群内部呈现显著条件$\beta$收敛趋势，且收敛速度有所提升。此外，经济发展水平等变量对城市生态韧性收敛的影响具有显著异质性。

## 参考文献（References）


[1] Bernard F, Harry G, Ron M. Recessionary shocks and regional employment: Evidence on the resilience of U K regions[J]. Journal of Regional Science, 2012, 52(1): 109-133.

[2] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: A review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 147: 38-49.

[3] Hosseini S, Barker K, Ramirez-Marquez J E. A review of definitions and measures of system resilience[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2016, 145: 47-61.

[4] 沈洁, 李燕, 夏春红, 等. 云南省城市生态韧性测度及时空演变研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(2): 55-58. [Shen Jie, Li Yan, Xia Chunhong, et al. Study on the measure and spatial evolution of urban ecological resilience in Yunnan[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(2): 55-58. ]

[5] 周成, 赵亚玲, 张旭红, 等. 黄河流域城市生态韧性与效率时空演化特征及协调发展分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1514-1523. [Zhou Cheng, Zhao Yaling, Zhang Xuhong, et al. Spatiotemporal evolutionary characteristics and coordinated development of urban ecological resilience and efficiency in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1514-1523. ]

[6] Botequilha-Leitão A, Díaz-Varela E R. Performance based planning of complex urban social-ecological systems: The quest for sustainability through the promotion of resilience[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 56: 102089, doi: 10.1016/j.scs.2020.102089.

[7] McPhearson T, Andersson E, Elmqvist T, et al. Resilience of and through urban ecosystem services[J]. Ecosystem Services, 2015, 12: 152-156.

[8] Ireni-Saban L. Challenging disaster administration[J]. Administration & Society, 2013, 45(6): 651-673.

[9] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991. [Wang Shaojian, Cui Zitian, Lin Jingjie, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 973-991. ]

[10] 陶洁怡, 董平, 陆玉麒. 长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1975-1987. [Tao Jieyi, Dong Ping, Lu Yuqi. Spatial-temporal analysis and influencing factors of ecological resilience in Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(9): 1975-1987. ]

[11] Chen T, Li Y L. Urban design strategies of urban water environment orientation based on perspective of ecological resilience[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(8): 26-39.

[12] 徐维祥, 郑金辉, 王睿, 等. 黄河流域城市生态效率演化特征及

门槛效应[J]. 地理科学, 2022, 42(1): 74-82. [Xu Weixiang, Zheng Jinhui, Wang Rui, et al. The evolution characteristics and threshold effects of the ecological efficiency in the Yellow River Basin Cities[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(1): 74-82. ]

[13] 茹少峰, 马茹慧. 黄河流域生态环境脆弱性评价、空间分析及预测[J]. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1722-1734. [Ru Shaofeng, Ma Ruhui. Evaluation, spatial analysis and prediction of ecological environment vulnerability of Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(7): 1722-1734. ]

[14] 穆学青, 郭向阳, 明庆忠, 等. 黄河流域旅游生态安全的动态演变特征及驱动因素[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 714-735. [Mu Xueqing, Guo Xiangyang, Ming Qingzhong, et al. Dynamic evolution characteristics and driving factors of tourism ecological security in the Yellow River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 714-735. ]

[15] 董洁芳, 张凯莉, 屈学书, 等. 黄河流域城市生态福利绩效测算及驱动因素研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 834-845. [Dong Jiefang, Zhang Kaili, Qu Xueshu, et al. Measurement and influencing factors of ecological well-being performance of cities in Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 834-845. ]

[16] 李思雅, 梁伟, 吕一河, 等. 黄河流域经济发展与生态环境压力的脱钩关系及其驱动效应分析[J]. 生态学报, 2023, 43(13): 5417-5431. [Li Siya, Liang Wei, Lü Yihe, et al. Decoupling relationship and driving effect between economic development and eco-environmental pressure in the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5417-5431. ]

[17] 王胜鹏, 乔花芳, 冯娟, 等. 黄河流域旅游生态效率时空演化及其与旅游经济互动响应[J]. 经济地理, 2020, 40(5): 81-89. [Wang Shengpeng, Qiao Huafang, Feng Juan, et al. The spatio-temporal evolution of tourism eco-efficiency in the Yellow River Basin and its interactive response with tourism economy development level[J]. Economic Geography, 2020, 40(5): 81-89. ]

[18] 谷昊鑫, 秦伟山, 赵明明, 等. 黄河流域旅游经济与生态环境协调发展时空演变及影响因素探究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 628-638. [Gu Haoxin, Qin Weishan, Zhao Mingming, et al. Spatial and temporal evolution and influencing factors of coordinated development of tourism economy and ecological environment in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 628-638. ]

[19] 郭海红, 刘新民. 沿黄地区中心城市新型城镇化与生态韧性的耦合协调机制研究[J]. 华东经济管理, 2023, 37(4): 101-109. [Guo Haihong, Liu Xinmin. Coupling and coordination mechanism of new urbanization and ecological resilience in central cities along the Yellow River[J]. East China Economic Management, 2023, 37(4): 101-109. ]

[20] 郭力, 李欣烨. 数字经济发展对黄河流域生态韧性的影响效应研究[J]. 决策与信息, 2023(5): 86-96. [Guo Li, Li Xinye. Study on the impact of digital economy development on the ecological resilience of the Yellow River Basin[J]. Decision & Information, 2023(5): 86-96. ]

[21] Chen Y, Miao Q Q, Zhou Q. Spatiotemporal differentiation and driving force analysis of the high-quality development of urban agglomerations along the Yellow River Basin[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(4): 2484, doi: 10.3390/ijerph19042484.

[22] 陈晓红, 娄金男, 王颖. 哈长城市群城市韧性的时空格局演变及动态模拟研究[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2000-2009. [Chen Xiaohong, Lou Jinnan, Wang Ying. Evolution and dynamic simulation of the temporal-spatial pattern of urban resilience in Harbin-Changchun urban group[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(12): 2000-2009. ]

[23] Ron B. Towards an evolutionary perspective on regional resilience[J]. Regional Studies, 2014, 49(5): 733-751.

[24] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. 经济地理, 2022, 42(8): 51-61. [Wang Songmao, Niu Jinlan. Dynamic evolution of urban ecological resilience and analysis of barrier factors in Shandong Peninsula urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2022, 42(8): 51-61. ]

[25] 许玉洁, 刘曙光. 黄河流域绿色创新效率空间格局演化及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 627-644. [Xu Yujie, Liu Shuguang. Spatial pattern evolution and influencing factors of green innovation efficiency in the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 627-644. ]

[26] Barro R J, Sala-I-Martin X. Technological diffusion, convergence and growth[J]. Journal of Economic Growth, 1997, 2(1): 1-26.

[27] Ansensin L, Raymond J, Florax G. Advances in spatial econometrics: Methodology, tools and applications[M]. Berlin: Springer, 2004: 5-17.

[28] 王松茂, 何昭丽, 郭英之, 等. 旅游减贫具有空间溢出效应吗?[J]. 经济管理, 2020, 42(5): 103-119. [Wang Songmao, He Zhaoli, Guo Yingzhi, et al. Does tourism poverty alleviation have spatial spillover effect?[J]. Business and Management Journal, 2020, 42(5): 103-119. ]

[29] Lesage J P, Pace P K. Introduce to spatial econometrics[M]. Boca Raton: Taylor & Francis, 2009.

[30] 邓宗兵, 何若帆, 陈钲, 等. 中国八大综合经济区生态文明发展的区域差异及收敛性研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(6): 3-25. [Deng Zongbing, He Ruofan, Chen Zheng, et al. Study on regional differences and convergence of ecological civilization development in eight comprehensive economic areas of China[J]. Journal of Quantitative & Technical Economics, 2020, 37(6): 3-25. ]

[31] 刘华军, 石印, 乔列成, 等. 中国全要素劳动生产率的时空格局及收敛检验[J]. 中国人口科学, 2020, 34(6): 41-53. [Liu Huajun, Shi Yin, Qiao Liecheng, et al. Spatial and temporal patterns of total factor labor productivity in China and tests of convergence[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 34(6): 41-53. ]

[32] 张卓群, 张涛, 冯冬发. 中国碳排放强度的区域差异、动态演进

及收敛性研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(4): 67-87. [Zhang Zhuoqun, Zhang Tao, Feng Dongfa. Study on regional differences, dynamic evolution and convergence of carbon emission intensity in China[J]. Journal of Quantitative & Technical Economics, 2022, 39(4): 67-87. ]

[33] 沈坤荣, 周力. 地方政府竞争、垂直型环境规制与污染回流效应[J]. 经济研究, 2020, 56(3): 35-49. [Shen Kunrong, Zhou Li. Local government competition, vertical environmental regulation, and pollution flowback effects[J]. Economic Research Journal, 2020, 56(3): 35-49. ]

# Spatiotemporal differentiation and convergence of urban ecological resilience in the Yellow River Basin: An empirical analysis based on 61 cities in seven major urban agglomerations

WANG Songmao, NING Wenping, NIU Jinlan, AN Kang

(College of Economics & Management, Shandong Agriculture University, Tai'an 271018, Shandong, China)

**Abstract:** The scientific measurement of the development status and convergence trend of urban ecological resilience in the Yellow River Basin urban agglomeration is of great significance for the ecological protection and high-quality development of Yellow River Basin. This study selects the panel data of 61 prefecture-level cities in the seven major urban agglomerations in the Yellow River Basin from 2011 to 2020, takes evolutionary resilience as the research perspective, constructs an urban ecological resilience evaluation index system from the dimensions of resistance-response-innovation, examines the spatial differentiation of urban ecological resilience using kernel density estimation and the natural break method, and analyzes the urban ecological resilience using different types of convergence models. This study shows the following: (1) The overall mean value of urban ecological resilience in the Yellow River Basin is 0.093, and the trend is slow. (2) The urban ecological resilience exhibits a spatial pattern of "strong downstream city clusters and weak upstream and midstream city clusters", and a decreasing spatial distribution of "core and provincial capital cities-peripheral and marginal cities" within the city clusters. (3) Absolute $\beta$ convergence exists in the Yellow River Basin and city clusters, among which the Jinzhong City cluster converges the fastest. After adding control variables, the Yellow River Basin and city clusters exhibit a significant conditional $\beta$ convergence trend, and the speed of convergence increases. In addition, the effects of economic development level, population density, and other variables on the convergence of urban ecological resilience are significantly heterogeneous.

**Key words:** Yellow River Basin; urban agglomeration; urban ecological resilience; spatiotemporal differentiation; spatial convergence